

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DEL TRABAJO DEL CORAZON EN LAS ALTURAS

POR JOAQUIN PRADO VILLAMIL
Médico

El trabajo del corazón ha sido un tema que ha entusiasmado por igual a fisiólogos y matemáticos y han sido muchos los estudios que se han llevado a cabo al respecto con lujo de detalles; las conclusiones que se han sacado de ellos están más o menos acordes y se ha logrado valorarlo, para la suma de los esfuerzos del corazón derecho e izquierdo, en un promedio de unos 1.205 kilográmetros por hora, en el individuo normal y en reposo.

Entre nosotros, hace algunos años, el doctor Antonio María Barriga Villalba se ocupó de este tema y lo trató con la seriedad y meticulosidad que lo caracterizan, dejándonos escritas páginas de incalculable valor científico.

En el presente estudio, no nos ocuparemos, pues, del trabajo del corazón en cuanto se refiere a la cifra que lo mide, ni a los procedimientos empleados para avaluarlo; nos contentaremos con recordar que el corazón es comparable a una bomba que tuviera que subir agua a un determinado nivel superior, en donde el trabajo dependería de la altura a la cual tuviera que hacerla llegar (presión), de la velocidad con que impulsara el agua y de la cantidad de líquido expulsado en cada bombeada. Asimismo, en el cálculo del trabajo del corazón intervienen tres factores principales que son: la presión arterial media, la frecuencia y el volumen sistólico; cualquier variación de estos factores hace variar también la cifra que mide el trabajo del corazón.

No es nuestro propósito volver sobre este tema, ni nos interesa en sí saber cuánto es el trabajo desarrollado por día. La pregunta que nos hacemos es esta: El corazón de un individuo que viva al nivel del mar rinde un trabajo determinado X ; si a este individuo lo montamos en un avión y lo llevamos a 3.000 o 4.000 metros de altura, por el solo hecho del ascenso a capas atmosféricas cada vez menos densas, ese trabajo X del corazón sufrirá un aumento, o por el contrario continuará efectuando un trabajo igual al desarrollado a 0 metros?

Esta pregunta ya se la han hecho fisiólogos y matemáticos y hay quienes sostienen que sí aumenta y otros que lo niegan. El doctor Barriga Villalba y el doctor Gnecco Mozo sostuvieron una interesante polémica al respecto en la cual el primero sostenía que el aumento del trabajo es cosa evidente, y el segundo lo negaba. De ahí que nos haya interesado mucho el tema y tal es el origen de este modesto estudio.

Para comprenderlo bien tendremos que tratarlo a al luz de la fisiología y debemos sentar algunas bases indispensables.

En primer lugar tenemos que considerar que se trata de un sujeto completamente normal y en condiciones de metabolismo basal mínimo, es decir, que apenas conserva sus funciones vitales para no sucumbir. En este caso la energía la obtiene de la mínima combustión de las sustancias energéticas de su organismo y como toda combustión no es posible realizarla sino en presencia del oxígeno, se deduce claramente que en esas condiciones la sangre está transportando el minimum de oxígeno posible por unidad de tiempo, para la conservación de la vida. El cálculo demuestra que no puede ser más ni puede ser menos del requerido.

Este estado sería comparable al de una bujía que arde en una atmósfera de oxígeno y que a voluntad pudiéramos graduar el suministro de este gas. Si gradualmente vamos disminuyendo el aporte de oxígeno, veríamos menguar su brillantez hasta llegar un momento en el cual no sería posible restarle más oxígeno, por pequeña que fuera esta cantidad, porque la bujía se apagaría. Este último sería el estado de "metabolismo basal mínimo" de la bujía.

En los animales superiores, la sangre es la única manera de transporte del oxígeno desde los alvéolos pulmonares hasta la más escondida célula del organismo, de tal manera que tendremos que estudiar detalladamente cómo se hace este transporte y las leyes que lo rigen.

El oxígeno se fija en la sangre en el momento de ponerse en contacto íntimo con los alvéolos pulmonares, así pues, nos es indispensable conocer la composición del aire que reina dentro de los alvéolos pulmonares, dato muchísimo más esencial que la composición del aire atmosférico, del cual no nos interesa saber sino que se compone de oxígeno y nitrógeno, pues estos gases al entrar a los pulmones se encuentran y suman con una mezcla de gases especial de los alvéolos que constituye el llamado "aire alveolar".

Este aire alveolar ha sido estudiado cuidadosamente, dada su grande importancia, y se halló que contiene una mezcla de cuatro gases principales (los gases raros del aire son despreciables) que son: vapor de agua, anhídrido carbónico, nitrógeno y oxígeno, y cuya presión total iguala a la presión atmosférica del lugar.

La física nos da a conocer la Ley de Dalton respecto a las presiones parciales de una mezcla de gases, que dice: "En una mezcla de gases a una determinada presión total P , cada gas tiene su propia presión parcial de acuerdo con el volumen que ocupe en la mezcla, y la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases es igual a la presión total P .

Por ejemplo: si tenemos una mezcla de 20% de Etileno, 50% de Nitrógeno y 30% de Oxígeno a una presión total de 600 mmHg. de Hg., la presión parcial de cada uno de ellos será: $\frac{20}{100}$ de 600 para el Etileno; $\frac{50}{100}$ de 600 para el Nitrógeno; y $\frac{30}{100}$ de 600 para el Oxígeno, o sea:

$$120 + 300 + 180 = 600$$

Y si generalizamos la ley, podemos escribir:

$$\frac{a}{100} P + \frac{b}{100} P + \frac{c}{100} P \dots + \frac{x}{100} P = P$$

Veamos, pues, qué ocurre con los cuatro gases que forman el aire alveolar, al nivel del mar:

a) *Vapor de Agua*. — Se encuentra siempre al estado de saturación en el aire alveolar y a la temperatura constante del cuerpo humano que es de 37° C. Según la tabla siguiente, su presión parcial es invariable y valdrá 47 mm. de Hg.

Grados C°	Milimtr. Hg.
0	4.6
10	9.2
20	17.5
30	31.8
37	47.
40	55.3
50	92.5

b) *Anhídrido Carbónico - CO₂*. — Es el producto de la combustión del carbono en el organismo y se elimina por los alvéolos pulmonares; su presión parcial es de 40 mmHg. y es una constante para cada individuo, su valor no varía en ascensos más o menos rápidos. (Más adelante veremos sus variaciones en el individuo aclimatado a las alturas).

De manera que la suma de las presiones parciales del vapor de agua y del anhídrido carbónico en el aire alveolar será a cualquier altura, en ascensos rápidos, de 87 mmHg.; el resto que queda de presión parcial para igualar la presión atmosférica es ocupado por el oxígeno y el nitrógeno.

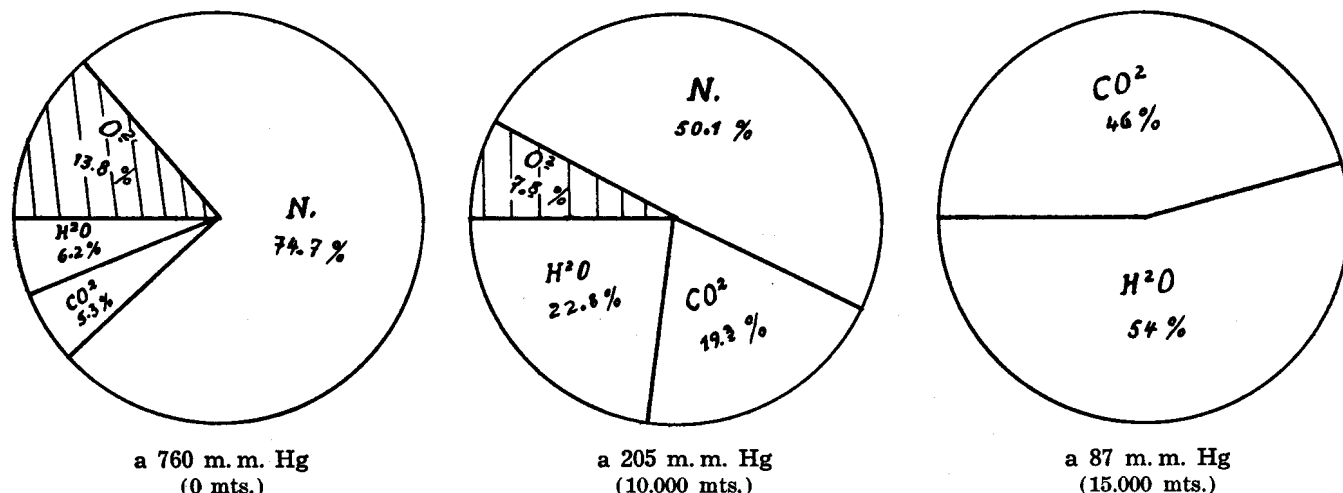
Este dato tiene una gran importancia porque a la presión de 760 mmHg., el vapor de agua y el CO₂ representan el 11.5% de la presión total, quedando un 88.5% para distribuir entre el O₂ y el N. En cambio a 10.000 metros de altura, por ejemplo, donde hay una presión atmosférica de 205 mmHg., el vapor de H₂O y el CO₂ representan el 42.4% del total de la presión, quedando únicamente un 57.6% para distribuir entre el O₂ y el N. Si continuamos subiendo hasta los 15.000 metros, donde la presión atmosférica es alrededor de 87 mmHg., se igualará en ese momento con la suma de las presiones parciales del H₂O y del CO₂, éstos colmarían por entero los alvéolos y sería físicamente imposible la respiración; no habría sitio para introducir otros gases (véase Gráf. No. 1).

c) *Nitrógeno*. — No desempeña mayor papel fisiológico, fuera de servir de diluyente al oxígeno, su presión parcial está en relación con la barométrica.

d) *Oxígeno (O₂)*. — Es el gas vital por excelencia, sin él no es posible la vida y en su ausencia el ser sucumbe por asfixia. Se combina con la sangre en los alvéolos pulmonares y es llevado por ésta, como vehículo, hasta la célula más escondida del organismo. Su aporte es proporcional a las necesidades de combustión, regulado por los mecanismos reflejos cardíacos y pulmonares, por eso en estado de metabolismo basal su aporte es el mínimo posible.

El oxígeno en presencia de la sangre no sigue las leyes de solubilidad de los gases en los líquidos; efectivamente no es una simple solución lo que acontece (como ocurriría en presencia del agua) sino que, por el contrario, tiene afinidad química con la hemoglobina de los glóbulos rojos, formando un compuesto nuevo inestable, llamado la oxihemoglobina.

Gráf. 1



bina, y bajo esta forma circula por los vasos sanguíneos.

El oxígeno se combina con la sangre siguiendo las leyes que rigen a los gases que tienen afinidad química con los líquidos en los cuales se disuelven. De éstas hay dos:

1º—El gas se combina íntegramente con el líquido, independientemente de su presión parcial, como ocurre con el anhídrido carbónico en presencia de una solución de NaOH.

2º—El gas se combina con el líquido en diferentes porcentajes bien definidos, según sea la presión parcial del gas en ese momento. Es el caso del oxígeno y la sangre.

De manera que es indispensable por una parte conocer la presión parcial del O₂ en el alvéolo pulmonar, puesto que es allí donde se ponen en contacto, y por otra parte debemos saber en qué porcentajes se combina a las diferentes presiones.

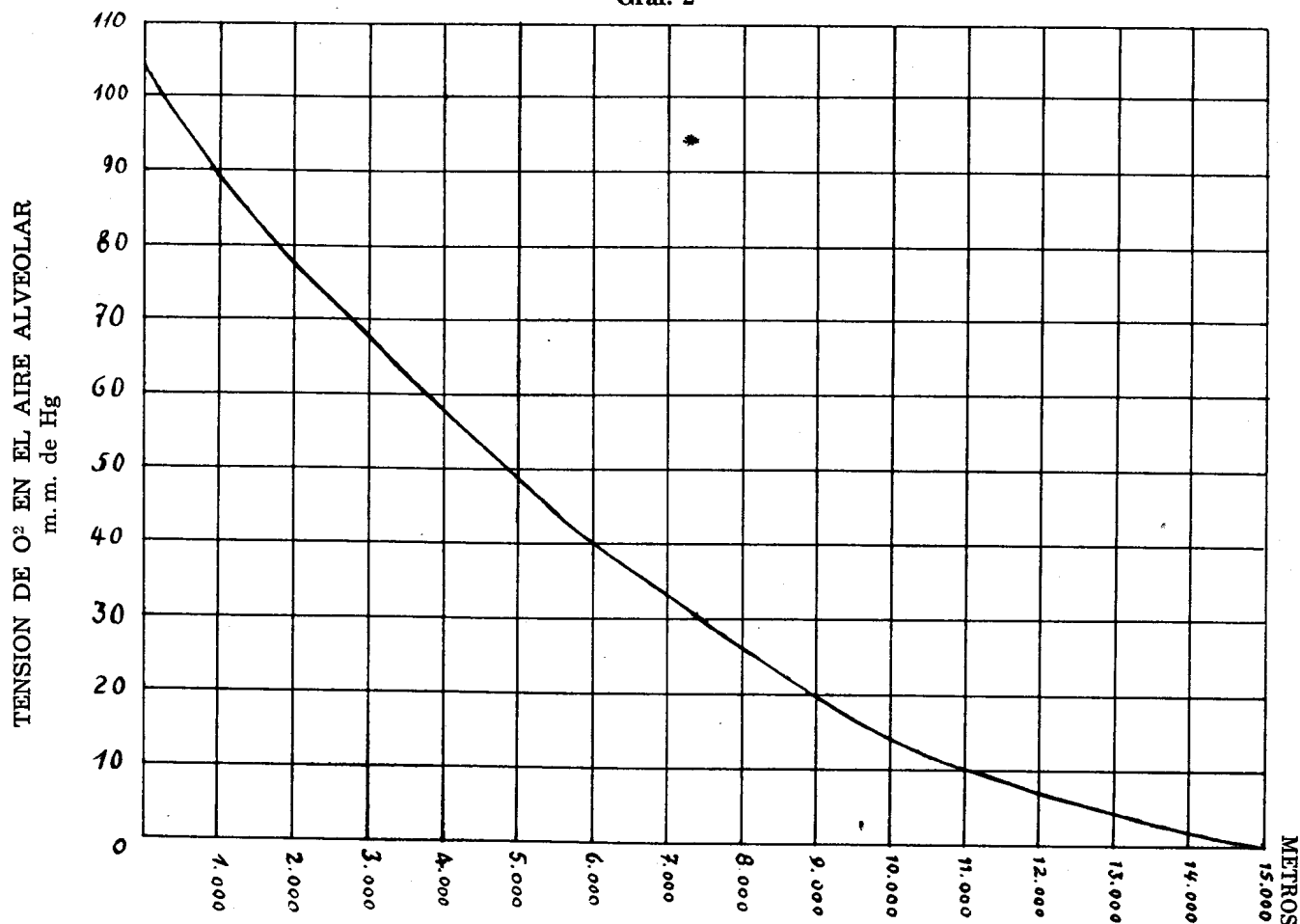
La presión parcial del oxígeno dentro del alvéolo pulmonar ha sido motivo de múltiples estudios y el cálculo y la experimentación están de acuerdo. Se han hecho cuidadosos análisis del aire alveolar, subiendo al individuo de 500 en 500 metros, y los resultados encontrados se llevaron a una gráfica donde las coordenadas representan las alturas en metros sobre el nivel del mar y las abscisas las presiones parciales del oxígeno correspondiente (véase Gráf. No. 2).

En cuanto a la manera de conocer el porcentaje de oxígeno que se combina con la hemoglobina cuando se hace variar la presión, se determinó experimentalmente tomando un volumen de sangre y sometiéndolo a presiones crecientes de 10 en 10 mm. Hg. y haciendo luego los análisis correspondientes. Se observó también que estos porcentajes variaban según los electrolitos disueltos en la sangre. La cantidad de CO₂ también lo hace variar, mientras más CO₂ haya menor es el porcentaje de oxígeno combinado. En la gráfica número 3 vemos la curva de saturación de la sangre normal (con 40 volúmenes de CO₂ que es lo corriente), cuando se somete a presiones variables de oxígeno. Obsérvese que la curva es una parábola; los primeros milímetros de presión saturan rápidamente de oxígeno la sangre, como si estuviera ávida de este gas, en cambio en los últimos milímetros las variaciones de saturación son insignificantes.

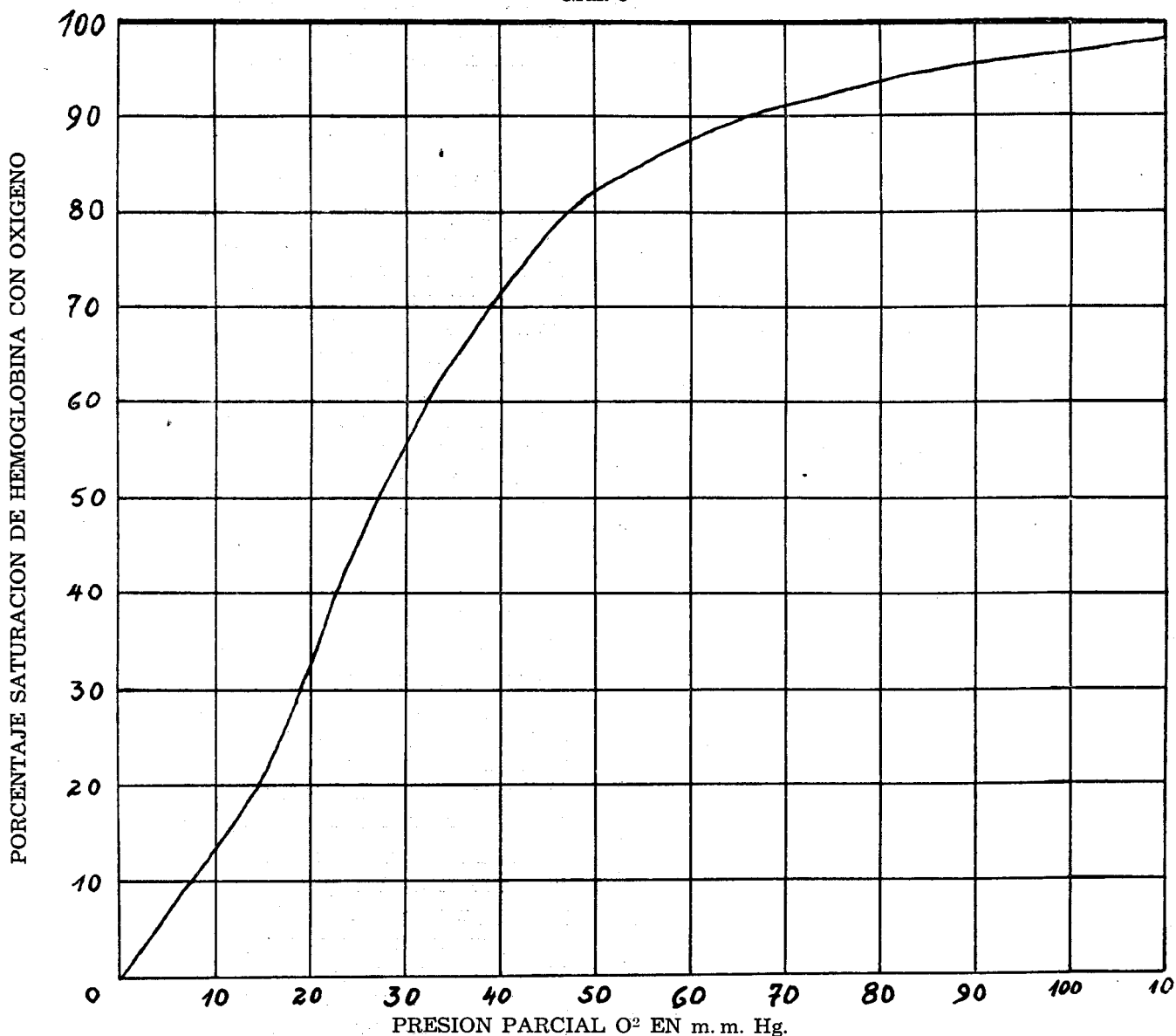
Por lo anterior hemos obtenido dos datos básicos. Si nos dan una altura sobre el nivel del mar, estamos en capacidad de saber cuál es la tensión parcial del oxígeno alveolar en ese lugar; y con el dato de esta presión parcial de O₂ podemos saber el porcentaje de saturación de la sangre normal con ese gas.

Con estos datos podemos abordar otro punto muy importante. Hemos dicho que un individuo en estado de metabolismo basal mínimo, consume la mínima cantidad de oxígeno posible por unidad de tiempo. Tratemos de averiguar cuál es esa cantidad.

Gráf. 2



Gráf. 3



Para ello se hace un análisis de sangre para determinar cuántos gramos de hemoglobina contienen 100 c.c. de sangre; la respuesta es que tiene variaciones con la edad, el sexo, la aclimatación, etc., pero que oscila entre un 13% a un 17%. Término medio 15%.

En seguida con otro análisis de laboratorio averiguamos cuántos centímetros cúbicos de oxígeno son capaces de combinarse con 1 gramo de hemoglobina. Hallamos que 1 gramo de hemoglobina (Hg) a saturación completa (100%) de oxígeno, puede captar de 1.32 cm³ a 1.36 cm³ de O₂. Término medio 1.34 cm³ de O₂.

Pues bien, supongamos como ejemplo para mejor comprensión de los cálculos, que se trata de un individuo cuya sangre contiene un 15% de Hg. y que cada gramo de hemoglobina toma 1.34 cm³ de oxígeno cuando está al 100% de saturación.

Entonces decimos: Si 1 gr. de hemoglobina se combina con 1.34 cm³ de O₂, los 15 grs. (contenidos en 100 c.c. de sangre) se combinarán con

$$15 \times 1.34 = 20.1 \text{ cm}^3 \text{ oxígeno.}$$

Luego cada 100 cm³ de sangre son capaces de combinarse con 20.1 cm³ de oxígeno al 100% de saturación. Pero como ya sabemos que la saturación depende de la presión parcial del oxígeno alveolar, basta con consultar la Gráf. No. 3 para saber el grado de saturación a una altura dada. Así decimos: si cuando hay un 100% de saturación la combinación se hace con 20.1 cm³, cuando hay una saturación S cuánta es la saturación?

$$\frac{100}{20.1} = \frac{S}{X}$$

Ejemplo. En Barranquilla donde la altura es 0 sobre el nivel del mar, la presión del O₂ alveolar es de 102 mml. (véase Gráf. No. 2); a esa presión corresponde un 98% de saturación del O₂ con la sangre (véase Gráf. No. 3). Cuánto oxígeno se combina con 100 cm³ de sangre?

$$\frac{100}{20.1} = \frac{98}{X}$$

De donde $X = 19.7 \text{ cm}^3 \text{ de O}_2$.

Hemos hallado, pues, la cantidad de oxígeno que deben transportar 100 c.c. de sangre, en la unidad

de tiempo, al nivel del mar, en el individuo que analizamos en estado de metabolismo basal.

Veamos qué ocurre si lo subimos en un avión a la altura de Bogotá que tiene 2.640 mts. sobre el mar. Consultando las gráficas 2 y 3 vemos que a esa altura corresponde una presión parcial de oxígeno alveolar de 72 mmHg. y que a esta presión se combina el 92% del oxígeno. ¿Cuánto O₂ contienen 100 c.c. de sangre?

$$\frac{100}{20.1} = \frac{92}{X}$$

De donde $X = 18.5 \text{ cm}^3$ de O₂.

Salta a la vista que un mismo volumen (100 c.c.) de sangre lleva menos oxígeno en la unidad de tiempo, en Bogotá que en Barranquilla, hay una diferencia del 1.2 cm³%. Pero sabemos de sobra que a este organismo en las condiciones que lo analizamos, no es posible quitarle ni la más mínima cantidad de oxígeno. Qué hará para compensar esta pérdida si la cantidad de hemoglobina 15% no es posible modificarla en pocos minutos y lo mismo ocurre con la capacidad de saturación de la sangre que seguirá siendo de 1.34 cm³ de O₂ por cada gramo de hemoglobina?

La única manera de poder compensar esta pérdida de oxígeno es aumentando la velocidad de circulación de la sangre para que en la unidad de tiempo (supongamos 1 segundo) la sangre aporte los 19.7 cm³ de O₂ que requiere el organismo. De manera que si al nivel del mar circulan 100 c.c. de sangre por segundo para aportar 19.7 cm³ de O₂, en Bogotá tendrán que circular más de 100 c.c. de sangre por segundo para poder llevar esos mismos 19.7 cm³ de O₂.

En el trabajo del doctor Barriga Villalba se observa claramente en las gráficas, cómo a medida que se gana altura aumentan la frecuencia del pulso y la amplitud de las pulsaciones, lo cual necesariamente tiene que aumentar la velocidad de la sangre.

Es muy sencillo calcular cuál será el exceso de volumen sanguíneo que debe circular para que en él esté contenida la diferencia de 1.2 cm³ de oxígeno que faltan, pues sabemos que en Bogotá cada 100 c.c. de sangre se saturan con 18.5 cm³ de O₂. Decimos: Si 100 c.c. se combinan con 18.5 de oxígeno, cuántos c.c. de sangre se combinan con 1.2 cm³ de O₂?

$$\frac{100}{18.5} = \frac{X}{1.2}$$

De donde $X = 6.5 \text{ c.c. de sangre.}$

De suerte que en la unidad de tiempo deben circular en Bogotá para aportar los 19.7 cm³ de oxígeno, no ya 100 c.c. de sangre, sino $100 + 6.5 = 106.5 \text{ c.c.}$ Los 100 c.c. llevan 18.5 de oxígeno y los 6.5 c.c. llevan 1.2 de oxígeno ($18.5 + 1.2 = 19.7$).

Finalmente, con otra proporción sabremos cuál es el aumento por ciento del trabajo del corazón para mover ese nuevo volumen. Razonamos: Si

cuando circulan 100 c.c. de sangre por segundo, le asignamos al trabajo del corazón un valor del 100%, cuando circulan 106.5 c.c. por segundo cuánto trabajará?

$$\frac{100 \text{ c.c.}}{100\%} = \frac{106.5 \text{ c.c.}}{X}$$

De donde $X = 106.5\%$

Lo que quiere decir que en Bogotá el corazón ya no trabaja un 100%, como al nivel del mar, sino un 106.5%, o sea que hay un aumento del 6.5%. Luego es evidente que el trabajo del corazón aumenta a medida que se asciende en la atmósfera con alguna rapidez, a causa de la disminución de la presión parcial del oxígeno.

Es bueno anotar que cuando un móvil aumenta su velocidad, entra en juego el factor inercia o fuerza viva, que es necesario sumar al aumento del trabajo y que se calcula por medio de la fórmula $\frac{mv^2}{2}$, donde m es la masa y v la velocidad. Esta cifra es despreciable cuando el aumento de velocidad es poco, pero adquiere valores muy grandes cuando la velocidad alcanza una buena proporción.

Ahora bien; todos los cálculos anteriores los hicimos, para facilitar la comprensión del asunto, sobre el caso particular de un sujeto cuya sangre tiene un 15% de hemoglobina, y donde cada gramo de ésta fija 1.34 cm³ de oxígeno, y lo hemos colocado sucesivamente en Barranquilla y Bogotá.

Pero nuestro deseo es generalizar el cálculo para cualquier individuo y para cualquier altura propuesta, pues ya vimos cómo son variables, para cada persona, los factores capacidad de saturación de la sangre con oxígeno (de 1.32 a 1.36) y el tanto por ciento que contiene en hemoglobina (de 13% a 18%). Para generalizar los cálculos podemos recurrir a una ecuación algebraica que sea aplicable a cualquier persona y a cualquier altura a donde se traslade. Veamos la manera de hacerlo.

Como cada caso es distinto del otro, lo primero que necesitamos es determinar por medio del laboratorio, la cantidad de hemoglobina que contienen 100 c.c. de sangre del candidato al experimento y luego determinar los centímetros cúbicos de oxígeno que son fijados por cada gramo de su hemoglobina.

Si llamamos V el volumen de sangre; $Hgl.$ los gramos de hemoglobina que contienen los 100 c.c. de sangre; y C la cantidad de cent. cúb. de oxígeno que fija cada gramo de hemoglobina analizada, tendremos que:

$$V \times \frac{Hgl.}{100} \times C = \text{Capacidad total de saturación (100\%) del volumen de sangre dado.}$$

Pero como sabemos que la saturación con oxígeno depende de la presión parcial de este gas en el aire alveolar (Gráf. 3), bastará con multiplicar la ecuación anterior por el porcentaje de saturación o índice de saturación, que llamaremos S , del lugar

propuesto y así sabremos la cantidad de O₂ que fija el volumen de sangre dado, o sea:

$$V \times \frac{Hgl.}{100} \times C \times \frac{S}{100} = \text{Centímetros cúbicos de oxígeno fijados en el lugar propuesto por cada volumen de sangre.}$$

La ecuación anterior puede también escribirse así:

$$\frac{V \times Hgl. \times C}{10.000} \times S = 02 \text{ fijado.}$$

Si estudiamos los términos de la ecuación última vemos que: *V*, es el volumen de sangre analizado (100 c.c.) que siempre es el mismo; *Hgl.*, es la cantidad de hemoglobina encontrada en ese volumen de sangre, dato que tampoco varía; *C*, es la capacidad de saturación de esa sangre, dato también invariable; y *S*, es el índice de saturación que varía con la altura donde se lleve al individuo, éste es el único término variable de la ecuación. De manera que el producto

$$\frac{V \times Hgl. \times C}{10.000} = K$$

será una constante para la persona que se analiza. La primera ecuación podremos entonces reemplazarla por esta otra mucho más sencilla:

$$K \times S = \text{cm}^3 \text{ de O}_2 \text{ fijados por cada 100 c.c. de sangre.}$$

Si llevamos al sujeto a otro sitio más elevado, el término *K* permanecerá constante, y el índice de saturación será *S'*, el valor de la ecuación en ese nuevo sitio será:

$$K \times S' = \text{cm}^3 \text{ de O}_2 \text{ fijados por cada 100 c.c. de sangre, en ese otro lugar.}$$

Por ejemplo: En Barranquilla será $K \times 98$

En Bogotá será $K \times 92$

Si restamos las dos ecuaciones obtendremos la diferencia de cantidad de oxígeno que hay entre el lugar inferior y el superior

$$K.S - K.S' = \text{Diferencia de oxígeno.}$$

Por medio de una sencilla proporción calculamos qué cantidad de sangre se requiere para fijar ese oxígeno faltante en la estación superior. Decimos: Si en ese lugar de mayor altura cada 100 c.c. de sangre fijan $K.S'$ cm³ de O₂, la diferencia $K.S - K.S'$ en cuántos centímetros de sangre se fijan

$$\frac{K.S'}{100} = \frac{K.S - K.S'}{X}$$

Haciendo las operaciones resulta

$$X = \frac{100 S}{S'} - 100$$

Esta ecuación representa precisamente el exceso de volumen de sangre que debe circular en la unidad de tiempo para completar la cantidad de oxígeno faltante con el fin de subvenir a las necesi-

dades mínimas de ese organismo. Y como los cálculos los estamos haciendo sobre 100 c.c. de sangre, representa también el exceso de trabajo del corazón, por ciento.

Ejemplo: Si en Barranquilla el índice de saturación es del 98%, ¿en qué porcentaje aumenta el corazón su trabajo en Bogotá, donde el índice de saturación es del 92%?

$$\frac{100 \times 98}{92} - 100 = 6.5\%$$

Aplicando esta fórmula es fácil hacer un cuadro donde esté indicado el aumento del porcentaje de trabajo del corazón, en ascensos de 1.000 en 1.000 metros, partiendo del nivel del mar, como puede verse.

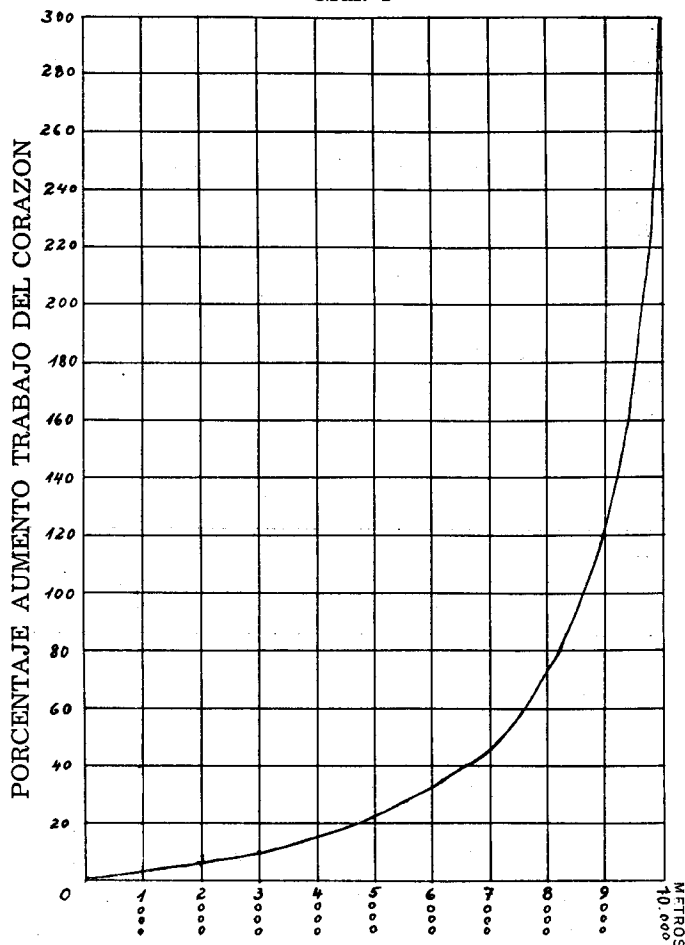
Altura sobre nivel del mar Metros	Presión barométr. mm. Hg.	Presión parcial O ₂ alveolar mm. Hg.	Porcentaje Saturación O ₂ en sangre	Porcentaje aumento trabajo corazón
0	760	105	98%	0%
1.000	675	87.3	95	3
2.000	598	77	93	5.3
3.000	529	67	90	8.9
4.000	466	53.3	86	14.0
5.000	411	48	81	21.0
6.000	360	40.5	74	32.0
7.000	315	34	67	46.0
8.000	274	27.7	55	78.0
9.000	242	22	44	120.0
10.000	205	16	24	315.0

Se ve en este cuadro cómo aumenta el trabajo del corazón a medida que se gana altura, y aún mejor representado está en la gráfica número 4, donde observamos que en los primeros metros es muy poco el aumento y en cambio en los últimos es vertiginoso.

Aun cuando en el cuadro consignamos el dato del aumento del trabajo hasta los 10.000 metros, la experiencia nos enseña que impunemente no puede llegar el hombre a tan gran altura, pues el descenso de la presión es tan grande que compromete el buen funcionamiento de todo el organismo. De manera que debemos estudiar el límite posible a donde pueda ascender el individuo, respirando normalmente el aire atmosférico (sin recurrir a inhalaciones de oxígeno ni a cámaras de presión), pues llegará un momento en que la presión parcial del oxígeno del aire alveolar baje tanto que no sea posible una correcta hematosi y entonces todo el organismo entra en anoxia y ya en condiciones patológicas el corazón anóxico no puede rendir más trabajo.

El responsable de la aparición de los síntomas que impiden seguir subiendo, no es el simple hecho de la baja de la presión barométrica, ésta, dentro ciertos límites, no provoca ninguna perturbación. El causante de todo es el descenso de la presión parcial del O₂ alveolar, pues cuando aparecen los

Gráf. 4



primeros síntomas basta con inhalar oxígeno puro para que todo entre en orden.

Para el ascenso hay un límite teórico y otro real.

El teórico sería cuando la cifra de 87 mm. Hg., que es la suma de las presiones parciales constantes del CO₂ (40 mm.) y del Vapor de agua (47 mm.) del aire alveolar, igualara a la presión atmosférica; en ese caso no habría manera de introducir ningún gas dentro de los alveólos por estar copados por esos dos gases. Este límite estaría alrededor de los 15.000 metros donde reina una presión atmosférica de unos 87 mm. Hg.

Pero el límite práctico o real está en un lugar muy inferior a los 15.000 metros. Tratemos de averiguarlo fisiológicamente.

A medida que se asciende en la atmósfera, la tensión parcial del oxígeno alveolar va descendiendo paulatinamente, hasta llegar a una cifra donde el porcentaje de oxígeno fijado por la sangre arterial no alcanza a sobrepasar satisfactoriamente las tensiones intracelulares, de aquí resulta que hay una mala oxigenación y aparecen entonces los síntomas de la anoxia, que son los que constituyen el "Mal de las alturas" o "Mal de las montañas". El principal y más objetivo de estos signos es la cianosis, en todos sus grados, debida a la hipo-oxigenación. Este signo es el que nos va a servir para el cálculo.

Experimentalmente se sabe que aparece la cianosis cuando en 100 c.c. de sangre de los capilares existe un mínimo de 5 grs. de hemoglobina sin oxi-

genar. Como sabemos que cada gramo de hemoglobina puede captar 1.34 cm³ de O₂, deducimos que para un promedio de 5 gr. sin oxigenar corresponden 6.7 cm³ de O₂ faltante en el momento de aparecer la cianosis.

Otro dato básico es que el porcentaje de oxigenación de la sangre capilar es el término medio del porcentaje de saturación de la sangre arterial y del de la venosa. $\left(Capl = \frac{a\% + v\%}{2} \right)$. Así también, el porcentaje de hemoglobina no saturada en la sangre capilar es el término medio entre el porcentaje de Hgl. no saturada en la sangre arterial y el no saturado en la sangre venosa.

Ahora bien; cada 100 c.c. de sangre arterial al pasar por los capilares cede aproximadamente 5.5 cm³ de O₂, de tal suerte que la diferencia en oxígeno entre la sangre arterial y la venosa es de 5.5 cm³. También sabemos, desde el principio de este trabajo, que la capacidad total (100%) de fijación de oxígeno de cada 100 c.c. de sangre es, en promedio, de 20.1 cm³ de O₂.

Con estos datos, ya sentados, es posible hacer los cálculos aproximados. Como ejemplo supongamos el caso al nivel del mar.

Capacidad total de saturación de O₂

en la sangre..... 20.1 cm³%

Saturación de O₂ de la sangre arterial 19.7 cm³%

Saturación de O₂ de la sangre venosa

(19.7 — 5.5)..... 14.2 cm³%

De donde deducimos que:

A la sangre arterial le falta para su saturación total 20.1 — 19.7 = 0.4 cm³ de O₂%.

A la sangre venosa le falta para su saturación total 20.1 — 14.2 = 5.9%.

O sea que a la sangre capilar le falta para su saturación total $\frac{0.4 + 5.9}{2} = 3.2$ cm³ de O₂. Lo que corresponde a 2.4 grs. de hemoglobina no saturada. No habrá cianosis porque no alcanzó a llegar a 5 grs. de Hgl. no saturada.

Generalizando y llamando A el porcentaje de saturación de la sangre arterial y V el porcentaje de saturación de la sangre venosa, podemos decir que:

$$\frac{(20.1 - A) + (20.1 - V)}{2} = \text{Cantidad de O}_2 \text{ que falta para saturar la sangre capilar.}$$

Pero ya dijimos que $V = A - 5.5$

De donde,

$$\frac{(20.1 - A) + (20.1 - (A - 5.5))}{2} = X$$

Haciendo las operaciones resulta:

$$X = \frac{45.7 - 2A}{2}$$

Cuando X tome el valor de 6.7 será el momento en que hay 5 grs. de hemoglobina sin saturar en

la sangre capilar y entonces comenzará a aparecer la cianosis.

$$6.7 = \frac{45.7 - 2A}{2}$$

Fácilmente podemos hallar el valor de A en la ecuación anterior, que traduce precisamente el grado de saturación de la sangre arterial.

$$A = \frac{45.7 - 13.4}{2} = 16.15$$

Lo que quiere decir que cuando en la sangre arterial hay 16.15 cm³ O₂% es cuando comienza la cianosis. Ahora bien: sabemos que cuando hay 20.1 de oxígeno % la saturación es del 100%, luego cuando hay 16.15 la saturación será del 83%. En el gráfico número 3 vemos que a una saturación del 83% corresponde una presión parcial de oxígeno alveolar de 53 mm. Hg, y en el gráfico número 2 observamos que a 53 mm. de presión corresponde una altura aproximada de 4.500 mts. sobre el nivel del mar.

De manera que los 4.500 mts. es el término medio del límite real hasta donde puede ascender una persona normal sin experimentar mayor molestia, porque los mecanismos adaptadores funcionan correctamente. Como este dato es un término medio nada más, habrá personas que antes de esta altura comiencen a sentir trastornos y otras, por el contrario, podrán propasar sin molestias los 4.500 mts. Los individuos acostumbrados a vivir en grandes alturas soportan muy bien el paso a niveles más altos. Las personas cuya constante K es alta son mucho más adaptables a las alturas que aquellas que tienen la constante K baja.

Otro asunto de gran interés en este mismo tema del trabajo del corazón y sus variaciones con las alturas, es el siguiente: Una persona ha subido en poco tiempo —digamos algunas horas— a una determinada altura y decide quedarse a vivir en ese sitio por largo tiempo; sabemos y aun lo podemos calcular, que al llegar a su nueva ubicación el trabajo del corazón ha aumentado en cierto porcentaje con relación al sitio inferior de donde proviene. Nos preguntamos: ¿Este aumento del trabajo del corazón es definitivo mientras viva allí? O, por el contrario, ¿pasado algún tiempo el organismo se adapta y aclimata a la nueva altura y, por consiguiente, tiene medios reguladores para hacer volver el trabajo del corazón a su cifra normal que tenía en la estación inferior, y de esta manera no condenar al corazón a aumentar su trabajo para siempre?

Hay varias razones para concluir que el organismo tiene medios para adaptarse a este nuevo estado e indirectamente quitarle al corazón el exceso de trabajo que se le impuso por la disminución del oxígeno. Estas razones son:

1º—Aumento de la presión parcial del oxígeno en el aire alveolar. Veamos cómo:

El centro bulbar respiratorio es sumamente sensible a la hipoxia, de manera que por ligera que ésta sea, como cuando se gana altura, provoca un reflejo que se traduce en aceleración de la respiración y mayor profundidad de la misma. Esto trae como consecuencia una verdadera barrida de CO₂ alveolar que hace disminuir paulatinamente su volumen en la mezcla de gases, por consiguiente disminuye su tensión parcial y deja así un mayor espacio para el oxígeno que se respira; es decir, éste puede ocupar un volumen mayor en la mezcla de gases alveolares y como consecuencia lógica aumenta su presión parcial. Ya vimos cómo a mayor presión parcial de O₂ en el aire alveolar hay una mayor saturación de la hemoglobina (Gráf. 3).

Según algunos experimentos para estudiar estas variaciones, se vio que un individuo llevado del nivel del mar a 4.000 mts. de altura, a los 35 días de permanencia allí, la presión parcial del CO₂ bajó de 40 mm. Hg. a 26 mm. para permanecer en adelante en esta cifra.

2º—Mayor disociación de la Oxihemoglobina. Experimentalmente se ha comprobado que la oxihemoglobina cede su oxígeno con más facilidad en medio ácido que en alcalino. Esto es precisamente lo que ocurre en las alturas como consecuencia de la disminución de la tensión parcial del CO₂ alveolar y por consiguiente del de la sangre. Se rompe el equilibrio ácido-básico y como resultado final ocurre una disminución de la reserva alcalina que es comparable a un estado de acidosis normal del individuo. En la gráfica número 5 podemos comparar la diferencia de saturación de la sangre con O₂ según que haya 20 o 40 volúmenes de CO₂; mientras menos CO₂ haya mayor es la oxigenación.

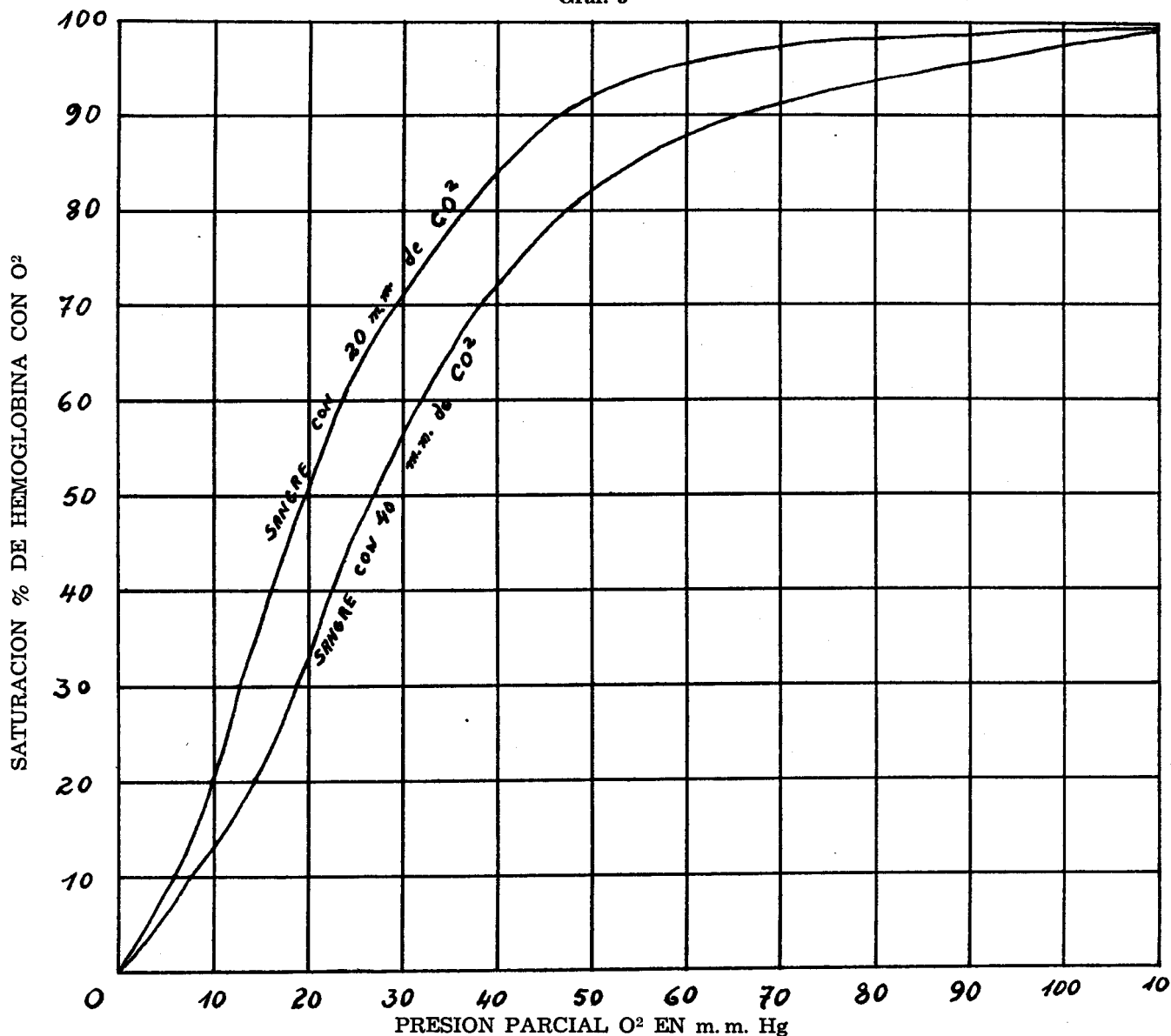
3º—Aumento de la cantidad de glóbulos rojos por milímetro cúbico.

Es un hecho sabido y comprobado que después de algún tiempo —semanas o meses— de vivir un individuo en las alturas aumenta paulatinamente su policitemia, según vemos en este cuadro (tomado de Houssey):

Altura mts.	Eritrocitos mm ³
0	4.25 millones
1.300	5.20 "
2.400	6.00 "
3.100	6.60 "
3.700	6.80 "
4.100	7.50 "
4.800	7.80 "
5.600	8.30 "

En esta forma se dispone de una mucha mayor cantidad de hemoglobina que transporte el oxígeno. Basta con recordar que cada glóbulo rojo contiene 30 micro-microgramos de hemoglobina y que un aumento de un millón de glóbulos rojos por milímetro cúbico de sangre, significa el aumento de un billón de glóbulos por litro, en los cuales hay contenidos

Gráf. 5



30 grs. de hemoglobina. De esta manera el factor *Hgl.* que interviene en la constante *K* sufre un aumento.

4º—Parece que la capacidad de fijación del oxígeno por la sangre aumenta con la altura. Así, si 1 gramo de *Hgl.* capta al nivel del mar 1.34 cm³ de O₂, a una altura de 4.000 mts., en el individuo aclimatado, capta 1.36 ctm. cúb. de O₂. En esta forma aumenta otro de los factores componentes de la constante *K*.

5º—El doctor Gonzalo Esguerra G. llevó a cabo un interesante estudio sobre la posibilidad de una hipertrofia cardíaca debida a un supuesto aumento del trabajo del corazón en las alturas y encontró que sus medidas radiológicas, relacionándolas con el índice antropométrico, eran iguales al nivel del mar que en las alturas; lo mismo en Nueva York que en Bogotá. Relacionó los datos encontrados por el doctor Benigno Jiménez en su trabajo de tesis "El Ortodiagrama", con el índice antropométrico, única manera de valorar estos datos, y halló que el resultado caía rigurosamente dentro

de lo normal. En conclusión, se puede decir que los diámetros cardíacos no aumentan en los individuos que viven en las alturas.

6º—Hay un hecho experimentado personalmente por cada individuo, que ocurre muy a menudo ahora que los viajes pueden realizarse tan rápidamente. Cuando una persona ha vivido por un tiempo largo en un lugar situado a baja altura y se traslada a otro de mayor altura, experimenta en las primeras semanas una sensación de asfixia y de cansancio al menor esfuerzo y llega a inquietarse porque siente que su corazón palpita fuertemente y cree que está enfermo de este órgano. Si en estas condiciones, por un esfuerzo de voluntad, trata de forzar al organismo a rendir un trabajo superior, puede sufrir un vértigo o un síncope por anoxia. Pero a las pocas semanas ya se siente perfectamente adaptado a la altura y todos los síntomas anteriores desaparecen y se desenvuelve con la misma facilidad que los nativos del lugar. Todo esto indica que el corazón estaba en un principio sometido a una sobrecarga de trabajo por falta de O₂, pero que a medida que transcurren los días esta sobrecarga va disminu-

yendo porque hay mecanismos indirectos que compensan la hipoxia y liberan al corazón de ese exceso de trabajo.

Todo esto indica que el organismo se pone en condiciones de volver a transportar la misma cantidad de oxígeno por unidad de tiempo, sin necesidad de aumentar la velocidad de circulación de la sangre y en esta forma el trabajo del corazón vuelve a su rendimiento primitivo, igual o muy semejante al que tenía en la estación inferior.

De tal manera que para calcular el aumento del trabajo del corazón en una altura mayor, no puede tenerse como base el trabajo al nivel del mar, sino del lugar donde el individuo esté aclimatado. Para aclarar pongamos un ejemplo: Supongamos a dos individuos normales, semejantes fisiológicamente, uno en Cartagena (0 mts.) y otro en Bogotá (2.640 mts.). Por los mecanismos de compensación y aclimatación, el trabajo del corazón debe ser igual o muy semejante para ambos individuos, aun cuando estén a diferente altura.

Ahora bien; subamos al de Cartagena en avión a 4.000 mts. y apliquemos la fórmula del aumento del trabajo,

$$\frac{100 S}{S'} - 100 = \frac{100 \times 98}{86} - 100 = 14\%$$

aumentará, pues, en una 14 por ciento.

Si subimos al de Bogotá a los mismos 4.000 mts., el aumento será:

$$\frac{100 \times 92}{86} - 100 = 7\%$$

Es decir, el de Cartagena aumentará su trabajo básico en un 14% y el de Bogotá aumentará ese mismo trabajo básico en un 7%, o sea exactamente la mitad.

De las consideraciones anteriores se deduce que la fórmula del trabajo total del corazón Z , con respecto a un cambio de altura más o menos rápida, sería: El trabajo del corazón en el lugar donde esté aclimatado T , más el aumento del porcentaje correspondiente de ese mismo trabajo al lugar donde se traslade $\frac{100 S}{S'} - 100$, más el valor de la fuerza viva debida al aumento de velocidad de la sangre $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$. Traducida a términos algebraicos sería:

$$Z = T + \frac{T \left(\frac{100 S}{S'} - 100 \right)}{100} + \frac{mv^2}{2}$$

y haciendo las operaciones indicadas resulta:

$$Z = \frac{T S}{S'} + \frac{mv^2}{2}$$

O sea que:

El trabajo total del corazón (Z) es igual a: el trabajo del corazón en el sitio donde esté aclimatado (T), multiplicado por el índice de saturación de la hemoglobina con 02 (S) en ese lugar, dividido por el índice de saturación (S') del lugar donde se traslade, más el componente cinético $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$

De ahí se deduce que el corazón de un individuo aclimatado en las alturas, está más preparado para emprender un ascenso a cierta altura, que el que vive al nivel del mar y tiene que remontarse a la misma altura.

Al comparar nuestros resultados con los obtenidos por el doctor Barriga Villalba, única y exclusivamente en cuanto a lo que se refiere a la diferencia del trabajo del corazón con respecto a los cambios de altura, hallamos algunas discrepancias. El doctor Barriga encuentra un aumento del 14% en la persona que sube de Barranquilla a Bogotá; nosotros encontramos únicamente un aumento del 6.5%.

En ningún momento queremos significar que los cálculos y fórmulas empleadas por el doctor Barriga estén errados, tratándose de una persona tan versada en las ciencias matemáticas. Solamente nos parece que quizás enfocó el tema desde un punto de vista diferente y que como éste no era el tema principal ni medular de su trabajo, no se extendió lo suficiente en la explicación de los cálculos para hacerlos entender de los que no trajinamos diariamente con las matemáticas.

Con esta debida aclaración, anotamos las discrepancias entre uno y otro estudio, donde nosotros tuvimos que servirnos de ciertos conceptos, que quizás para los cálculos del doctor Barriga Villalba no le eran necesarios.

1º—Para la fijación del oxígeno en la sangre lo importante es la composición del aire alveolar y no la del atmosférico, que son bien diferentes, puesto que la sangre se pone en contacto íntimo con el primero y no con el segundo.

2º—El oxígeno se combina químicamente con la hemoglobina para formar un nuevo producto, la oxihemoglobina, y esa combinación sigue las leyes de los gases que tienen afinidad química con el solvente (V. Gráf. 3) y no simplemente las que rigen la solución de los gases en los líquidos, que son muy distintas. Al leer al doctor Barriga nos parece que él consideró la absorción del oxígeno por la sangre como una simple solución en cualquier líquido, pues al referirse a este punto dice textualmente “basados rigurosamente en las leyes conocidas de *solubilidad de los gases*, podemos escribir la expresión final que nos indica el trabajo del corazón..., etc.”.

3º—Hay razones muy convincentes para creer que cuando una persona se traslada por un tiempo largo (semanas o meses) a un lugar de mayor altura, el organismo se aclimata y adapta a esas nuevas condiciones y existen mecanismos indirectos que hacen volver el corazón al trabajo primitivo que tenía cuando estaba a menor altura, conforme lo comentamos atrás.

Es lo más posible que el doctor Barriga no pensara en esa posibilidad y quizás jamás sus intenciones fueran avocar este problema, enteramente

distinto y ajeno a su trabajo. El comenta: "Esto significa, que el corazón en Bogotá, *después de su aclimatación*, aumenta en un 14% su energía potencial..., etc."

Y para el cálculo final del trabajo del corazón, dice: "Esta expresión es la siguiente:

$$T = T_{76} \left(2 - \frac{H'}{H} \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{D'}} \right) "$$

"Esto quiere decir: El trabajo del corazón en una estación superior, es igual al trabajo del mismo corazón en el nivel del mar, aumentado en relación inversa de las presiones de la atmósfera y en relación directa de las raíces cuadradas de las densidades del aire".

Nosotros propondríamos substituir esta fórmula del doctor Barriga, por la deducida y estudiada en las páginas anteriores que es:

$$Z = \frac{TS}{S'} + \frac{mv^2}{2}$$

O sea:

El trabajo total del corazón (Z) en una estación superior, es igual al trabajo (T) del corazón en el lugar *donde esté aclimatado*, multiplicado por el índice de saturación (S) de la hemoglobina con oxígeno en ese lugar de aclimatación, dividido por el índice de saturación (S') del lugar a donde se traslada y agregado del componente cinético $\frac{mv^2}{2}$

En cuanto al estudio del doctor Francisco Gnecco Mozo, sobre el trabajo del corazón, nos permitimos hacer algunas observaciones.

a) El volumen sistólico no es en realidad una cantidad invariable que no pueda adaptarse a las circunstancias; puede ser constante, para el individuo, en determinadas condiciones estables. Pero cuando el organismo necesita mayor cantidad de sangre por unidad de tiempo, para cualquiera de sus requerimientos, v. gr., ejercicio físico exagerado, el volumen sistólico se adapta y aumenta. Houssay se refiere a este punto en los siguientes términos: "Además de la serie de variaciones del volumen ventricular durante un ciclo completo de la actividad cardíaca, es interesante tener una idea de las oscilaciones del volumen cardíaco en una serie de latidos, ya que, especialmente cuando obran circunstancias que modifican las condiciones del funcionamiento cardíaco, no todos los latidos presentan iguales tamaños sistólicos y diastólicos." Y más adelante dice: "Las variaciones del aflujo venoso producen variaciones paralelas del volumen ventricular medio. Si aumenta o disminuye el aporte venoso, aumenta o disminuye también el volumen ventricular medio, debido especialmente a variaciones del tamaño diastólico".

No compartimos, pues, la idea del doctor Gnecco cuando dice que el volumen sistólico es una constante invariable.

b) No hay razón ninguna para pensar que el trabajo del corazón permanezca invariable cuando el individuo gana altura en corto tiempo. Por el contrario, a medida que se asciende, tanto el oxígeno atmosférico como el alveolar van disminuyendo gradualmente y como la sangre es el único vehículo para movilizar este gas, tiene que reemplazar la disminución de éste, aumentando la velocidad circulatoria, cosa que acarrea necesariamente un aumento del trabajo cardíaco para movilizar un volumen mayor de sangre por minuto. En el individuo aclimatado el asunto es muy diferente porque hay medios indirectos para reemplazar el oxígeno faltante y quitarle ese exceso de trabajo al corazón, como lo sugerimos en páginas anteriores.

c) El doctor Gnecco Mozo llevó a cabo una excursión en funicular al cerro de Monserrate para observar lo que ocurría en el ascenso. Encontró que en 5 personas de las 6 que subieron había un aumento de 2 a 6 pulsaciones, y concluyó que un aumento tan pequeño no era de tenerse en cuenta y que eso probaba la igualdad de trabajo en la base y en la cima del cerro.

Nosotros no pensamos igual y nos pareció bien calcular los resultados del doctor Gnecco. Las deducciones tienen un valor muy relativo porque la subida al cerro tuvo más de paseo que de experimentación, pues casi todo se redujo a contar cuidadosamente las pulsaciones al pie y en lo alto del cerro.

Sabemos que en el trabajo del corazón intervienen tres factores principales que son: Presión arterial media, Volumen sistólico y Frecuencia. El doctor Gnecco afirma que las dos primeras son constantes e invariables y en cambio las pulsaciones sí aumentan; lógicamente el trabajo cardíaco debe aumentar proporcionalmente.

Estudiando los datos del experimento encontramos que en la base del cerro, el promedio de las pulsaciones de las seis personas es de 79 por minuto y en la cima de 83. Si consideramos que el valor más aproximado de la descarga ventricular es de 120 c.c. (conjunto de los dos ventrículos), el volumen de sangre movido por minuto en la base será de $120 \times 79 = 9.480$ c.c. y el volumen movido en la cima será de $120 \times 83 = 9.960$ c.c.

Con una simple proporción podemos encontrar el porcentaje de aumento del trabajo cardíaco. Decimos: si cuando mueve un volumen de 9.480 c.c. le asignamos un trabajo del 100%, cuando mueve 9.960 c.c. cuánto trabaja?

$$\frac{9.480}{100} = \frac{9.960}{X}$$

$X = 105\%$, o sea que el trabajo es de un 5% mayor en la altura que en la base. No es pues tan despreciable el aumento del número de las pulsaciones, por pocas que éstas sean.

Si por curiosidad aplicamos la fórmula ya estudiada en anteriores páginas, para calcular el por-

centaje del aumento del trabajo cardíaco, sabiendo que en Bogotá, a 2.640 mts., el índice de saturación es del 92% y en la cima de Monserrate, a 3.150 mts., el índice es del 88%, resulta:

$$\frac{100 S}{S'} - 100 = \frac{100 \times 92}{88} - 100 = 4.5\%$$

Es sorprendente la similitud de los dos resultados y los experimentos del doctor Gnecco parecen como hechos expresamente para probar que la ecuación anterior se cumple con bastante exactitud y por consiguiente que el trabajo del corazón sí aumenta con la ascensión rápida en la atmósfera.

CONCLUSIONES

Del estudio del presente trabajo inferimos que:

1º—En las ascensiones más o menos rápidas, el corazón aumenta su trabajo en una proporción bien definida y calculable.

2º—Que después de algunas semanas el organismo se aclimata a la altura y el aumento de trabajo impuesto al corazón, va regresando paulatinamente hasta volver a su cifra normal.

3º—Que todos estos cálculos tienen valor cuando el individuo respira aire atmosférico en alturas comprendidas entre 0 mts. y 4.500 mts. aproximadamente, pues de allí para arriba ocurren perturbaciones fisiológicas y patológicas que impiden una adaptación satisfactoria por parte del organismo.

Bogotá, septiembre de 1953.

BIBLIOGRAFIA

- Barriga Villalba A. M.** — "El trabajo del corazón y la presión arterial media. De cómo el trabajo del corazón aumenta en las alturas". *Rv. Colg. Rosario*. Sep. 1936.
- Bateman Alfredo.** — "Caldas y el Hipsómetro". *Rev. Ciencias Exact. Fis. y Nat.* Junio 1952.
- Esguerra G. Gonzalo.** — "Question of cardiac hypertrophy in residents of high altitudes". *The Journal of the Amer. Med. Association*. Agst. 1948.
- Esguerra G. Gonzalo.** — "Importance of the relation between the anthropometric index and the transverse cardiac diameter for appraising the size of the heart". *Radiological Society of North Amerc.*
- Esguerra G. Gonzalo.** — "Estudios radiológicos para avaluar el tamaño del corazón en los individuos normales que viven en la ciudad de Bogotá". *Bolet. Clin. Marly*. Jun. 1945.
- Gnecco Mozo Francisco.** — "El trabajo del corazón en Bogotá".
- Gnecco Mozo Francisco.** — "Más sobre el trabajo del corazón en Bogotá". *Rev. Fac. Medic.* Mayo 1937.
- Trujillo G. Carlos.** — "Juicio crítico sobre un trabajo científico (El trabajo del corazón en Bogotá)". *Rev. Fac. Medic.* Junio 1936.
- Harry G. Armstrong.** — "Principles and practice of aviation Medicine".
- Chalmers Gemmill.** — "Physiology in aviation".
- War Department (U.S.A.).** — "Notes en physiology in aviation".
- J. Malmejac.** — "Medicine de l'aviation. Bases physiologiques et phisiopatologiques".
- Cameron A. T.** — "Manual de bioquímica".
- Cristol Paul.** — "Précis de chimie biologique médical".
- E. Gley.** — "Traité de Physiologie".
- Ganot Manuevrier.** — "Traité de physique".
- H. Hedon.** — "Précis de Physiologie".
- L. Hugounenq.** — "Précis de chimie physiologique et pathologique".
- Magner-William.** — "A textbook of hematology".
- Polonowsky et Lespagnol.** — "Elements de chimie organique et biologique".
- Roger et Binet.** — "Traité de physiologie".
- Howell.** — "A textbook of physiology".
- Houssay.** — "Fisiología humana".
- Osgood.** — "Laboratory diagnosis".
- Gradwohl.** — "Clinical Laboratory".